

# GPS 天线相位中心偏差的水平分量检测与改正

魏锦德 黄张裕 邱华旭 郑建雷

( 河海大学地球科学与工程学院 南京市 210098)

**提 要** 在高精度的 GPS 定位测量中, 天线相位中心误差是不容忽视的。在进行静态相对定位测量时, 必须进行天线定向, 或对天线相位中心进行必要的模型改正。通过研究 GPS 天线相位中心的几何关系, 探讨检测天线相位中心误差的相对定位检测方法, 检测出 GPS 天线相位中心偏差的水平分量, 并研究相应的改正处理方法。实例验证该方法具有较高的可靠性和精度, 适合野外作业对 GPS 天线的检测。

**关键词** GPS 天线相位中心偏差 水平分量 检测 改正

## Detection and Correction of Horizontal Component of Antenna Phase Center Offsets of GPS

Wei Jinde Huang Zhangyu Qiu Huaxu Zheng Jianlei

( School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University)

**Abstract** In GPS location measurement with high precise, the errors of antenna phase center can't be neglected. It is necessary to orient the antenna or correct the model for antenna phase center in static relative location measurement. This thesis studies the geometrical relationship of antenna phase center of GPS, explores the relative detection method of antenna phase center errors, detects the horizontal component of antenna phase center offsets and discusses some correction process method. The case proves the method has high reliability and accuracy, and it is suitable to detect the GPS antenna in field work.

**Keywords** GPS; antenna phase center offsets; horizontal component; detection; correction

### 1 引言

GPS 定位在测绘领域应用十分广泛, 其作业速度快、精度高、布点灵活、可以全天候作业<sup>[1]</sup>。GPS 定位测量是以 GPS 天线相位中心为基准的, 而在定位测量中对中、量天线高时则以天线参考点( 天线几何中心) 为基准的。实际上, GPS 天线相位中心与天线参考点间往往是不一致的, 在高精度测量中需要进行天线相位中心误差的检测与改正。

GPS 天线相位中心误差通常可分为两个部分: 一是天线相位中心偏差( PCO), 天线的平均相位中心( 天线的瞬时相位中心的平均值) 与天线参考点之间的偏差; 二是天线相位中心变化( PCV), 天线的瞬时相位中心与平均相位中心的差值。对于某一天线而言, 天线相位中心偏差可以看成是一个固定的

偏差向量, 而天线相位中心变化则与信号方向有关, 会随着信号的方位角及天顶距的变化而变化<sup>[2]</sup>。天线相位中心偏差可能会使 GPS 定位引起几毫米至几厘米的误差, 这对于高精度的 GPS 测量产生很大影响, 因此如何检测与改正天线相位中心偏差是天线设计中的一个重要问题。

### 2 天线相位中心偏差的检测

#### 2.1 相对定位检测法

相对定位检测法是在超短基线上进行 GPS 观测, 通过基线解算来检测出天线相位中心偏差。这种方法操作简单、方便, 通常为测量外业人员所采用。在天空视野开阔、无强电磁干扰的野外, 将 GPS 接收机分别安置在超短基线上的端点上, 选择三维定位图形强度因子 PDOP  $\leq 6$  所对应的时间段进行观测。本文主要研究天线相位中心偏差的水平分量检测。

选择合适的检测场地, 测试时将两台接收机分

作者简介: 魏锦德( 1988 - ), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 GPS 数据处理研究。

收稿日期: 2012 - 04 - 23

别安置在两个基线端点  $C$ 、 $D$  上,精确对中、整平。第一个观测时段中两个天线定向指标都指向正北,观测一个时段(1.5h);然后固定一个天线  $A$  不动,另外一个天线  $B$  依次旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  再测 3 个时段;之后,天线  $B$  指向正北不动,原固定不动的天线  $A$  依次旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  再测 3 个时段。共观测了 7 个时段,分别求出各个时段的基线值。

如图 1 所示, GPS 天线  $A$  与  $B$  分别安置于两个基线端点上,其中  $OA$  是天线  $A$  的天线参考点,  $OB$  是天线  $B$  的天线参考点,  $A_1$  是天线  $A$  的相位中心,  $B_1$  是天线  $B$  的相位中心。设以天线参考点  $OA$  为原点,以天线  $A$  的正北方向为  $X$  轴,以  $OA$  的天顶方向为  $Z$  轴,  $Y$  轴与  $X$ 、 $Z$  轴构成右手坐标系。

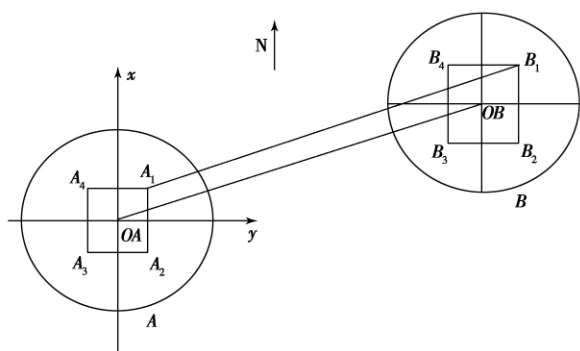


图 1 天线相位中心偏差的水平分量检测示意

第 1 观测时段中,天线  $A$ 、 $B$  都指向正北,天线  $A$  的相位中心  $A_1$  的坐标为  $(N_1, E_1)$ , 天线  $B$  的相位中心  $B_1$  相对  $OB$  点的位置为  $(N_2, E_2)$ 。第 2 到第 4 观测时段中,天线  $A$  指向正北固定不动,天线  $B$  顺时针依次旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  后  $B_1$  分别转到  $B_2(-E_2, N_2)$ 、 $B_3(-N_2, -E_2)$ 、 $B_4(E_2, -N_2)$  的位置。同理第 5 到第 7 时段中,天线  $B$  指向正北固定不动,天线  $A$  顺时针依次旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  后  $A_1$  分别转到  $A_2(-E_1, N_1)$ 、 $A_3(-N_1, -E_1)$ 、 $A_4(E_1, -N_1)$  的位置。 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别是天线参考点  $OA$  与  $OB$  的坐标差; $dx_i$ 、 $dy_i$  分别是第  $i$  测段的第  $i$  基线测量的  $x$  坐标差与  $y$  坐标差。由图 1 中的几何关系得出下列关系式,如表 1 所示。

表 1 坐标差的相互关系式

天线 A 方向	天线 B 方向	关系式
N	N	$dx_1 = \Delta x + N_2 - N_1$ ; $dy_1 = \Delta y + E_2 - E_1$
N	E	$dx_2 = \Delta x - E_2 - N_1$ ; $dy_2 = \Delta y + N_2 - E_1$
N	S	$dx_3 = \Delta x - N_2 - N_1$ ; $dy_3 = \Delta y - E_2 - E_1$
N	W	$dx_4 = \Delta x + E_2 - N_1$ ; $dy_4 = \Delta y - N_2 - E_1$
E	N	$dx_5 = \Delta x + N_2 + E_1$ ; $dy_5 = \Delta y + N_2 - N_1$
S	N	$dx_6 = \Delta x + N_2 + N_1$ ; $dy_6 = \Delta y + E_2 + E_1$
W	N	$dx_7 = \Delta x + N_2 - E_1$ ; $dy_7 = \Delta y + E_2 + N_1$

分析检测观测数据,采用最小二乘法,解算未知数  $N_1$ 、 $E_1$ 、 $N_2$ 、 $E_2$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 。采用间接平差方法进行平差计算,其中观测量为  $dx_i$ 、 $dy_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 7$ ), 即  $n = 14$ ,  $t = 6$ ,  $r = 8$ 。

选取六个独立参数  $\hat{X} = (N_1, E_1, N_2, E_2, \Delta x, \Delta y)^T$ , 共构成 14 个观测方程:

$$\hat{L} = B \hat{X} - d \quad (1)$$

则可列出误差方程:

$$V = B \hat{X} - L \quad (2)$$

组成法方程:

$$B^T P B \hat{x} = B^T P L \quad (3)$$

解出  $\hat{x}$ , 并求单位权中误差:

$$\hat{\sigma}_0 = \pm \sqrt{\frac{V^T P V}{n - t}} \quad \sigma_{\hat{x}_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{\hat{x}_i \hat{x}_i}} \quad (4)$$

从而可得到天线  $A$ 、 $B$  的天线相位中心偏差的水平分量  $A_1(N_1, E_1)$ 、 $B_1(N_2, E_2)$ , 并分析其精度。

## 2.2 绝对定位检测法

绝对定位检测法通常有两种方法:一种是微波暗室检测法,在微波暗室中用微波信号发生器所产生的模拟 GPS 信号来对接收机天线进行检测;另一种是利用机器人旋转、倾斜 GPS 天线和自动控制程序,连续观测两个恒星日,测定出天线相位中心误差。通过绝对定位检测法可以检测出 GPS 天线的天线相位中心偏差与天线相位中心变化。这两种方法的技术要求高、费用比较昂贵,一般国家实验室和天线制造厂家才具备<sup>[3]</sup>。

## 3 天线相位中心偏差的改正

实践中,通过以上方法可以检测出 GPS 天线相位中心误差,最终应采用适当的方法进行天线相位中心改正。一种方法是在基线解算前,将天线的天线相位中心偏差加到观测文件中去,通过对观测数据的预处理进行改正。另一种方法是数据处理后,将 GPS 天线相位中心的位置归算到参考点的位置。

归算方法如下: 天线参考点位置 = 天线相位中心位置 - 天线相位中心偏差。

将测站地平坐标系的三个分量  $(N, E, U)$  采用下式进行坐标转换到空间直角坐标系<sup>[4]</sup>:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{PCO}} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix}_{\text{PCO}} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{天线参考点}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{天线相位中心}} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{PCO}} \quad (6)$$

求出 GPS 天线参考点的坐标后,再根据天线对中及仪器高等数据求得标石中心的坐标位置。GPS 天线的天线相位中心变化通常是用来改正距离观测值的。

具体公式如下:几何距离 = 观测距离 - 天线相位中心变化 + 其他改正项。

实际工作中,基线长度一般较长,则需采用如下的天线相位中心变化改正模型<sup>[5]</sup>:

$$\Delta\varphi(\alpha,z)=\Delta\varphi(\alpha,z)-\Delta\varphi_0+\Delta r\cdot e\tag{7}$$

式中  $\alpha$  和  $z$  分别为卫星的方位角和天顶距;  $\Delta\varphi_0$  是由  $\Delta\varphi(\alpha,z)=0$  定义的一个固定的相位偏移量;  $\Delta r$  表示平均天线相位中心至天线参考点的距离;  $e$  定义为接收机 - 卫星方向的旋转矩阵。

4 实例计算

按照我国测绘行业 CH8016 - 1995《全球定位

系统(GPS)测量型接收机检定规程》规定,GPS 天线相位中心误差应小于 GPS 接收机的固定误差(一般为  $\pm 5\text{mm}$ )。按照以上所述的检测方法,在某检测场测量了两台 TRM33429.00 + GP 天线的天线相位中心偏差的水平分量。由于 GPS 观测得到的基线为 WGS - 84 坐标系的坐标(  $X,Y,Z$  ),而天线相位中心误差的坐标为以  $A$  点为原点的站心地平直角坐标(  $x,y,h$  ),两个坐标系间的转换关系式为<sup>[6]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B\cos L & -\sin B\sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B\cos L & \cos B\sin L & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}\tag{8}$$

将 L1 波段与 L2 波段对应的空间基线(  $dX,dY,dZ$  ),分别转化为站心地平坐标系下的基线(  $dx,dy,dh$  )。受篇幅限制,本文只给出 L1 波段下的基线向量,详见表 2。

表 2 L1 波段下的空间基线和地平坐标基线 m

时段	空间基线				地平坐标基线			
	dX	dY	dZ	基线值	dx	dy	dh	基线值
1	0.3435	-0.6783	0.7500	1.0680	-0.3006	-0.7572	0.6906	1.0680
2	0.3436	-0.6784	0.7501	1.0681	-0.3007	-0.7573	0.6906	1.0681
3	0.3427	-0.6769	0.7502	1.0670	-0.3008	-0.7556	0.6907	1.0670
4	0.3420	-0.6762	0.7532	1.0684	-0.3020	-0.7546	0.6934	1.0684
5	0.3436	-0.6764	0.7521	1.0683	-0.3026	-0.7556	0.6919	1.0683
6	0.3431	-0.6773	0.7513	1.0681	-0.3014	-0.7561	0.6916	1.0681
7	0.3437	-0.6786	0.7512	1.0691	-0.3012	-0.7576	0.6916	1.0691

因此,通过 7 条基线的解算,可计算出 L1、L2 波段下 GPS 天线 A、B 的天线相位中心偏差的水平分量  $N_1,E_1,N_2,E_2$ ,如表 3 所示。

表 3 天线相位中心偏差的水平分量计算结果 mm

天线相位中心偏差	$N_1$	$E_1$	$N_2$	$E_2$
L1 波段	-0.4	-0.1	-0.5	-0.6
L2 波段	-1.6	-2.3	-1.8	-2.5
精度(L1 波段)	$\pm 0.13$	$\pm 0.13$	$\pm 0.13$	$\pm 0.13$
精度(L2 波段)	$\pm 0.16$	$\pm 0.16$	$\pm 0.16$	$\pm 0.16$

如表 3 所示,分析实例中不同波段下的天线相位中心偏差检测值及精度,水平分量最大是  $-2.5\text{mm}$ ,在规定的限差范围内(  $\pm 5\text{mm}$  );偏差达到毫米级。因此,需要对天线相位中心进行必要的改正。由公式(5),可计算得到空间直角坐标系下的改正分量(  $X,Y,Z$  )<sub>PCO</sub>。因此,实例证明上述检测方法正确、有效。

5 结束语

本文通过研究 GPS 天线相位中心的几何关系,采用相对定位检测方法,检测出 GPS 天线相位中心

偏差的水平分量,并对其进行改正。实例证明不同波段下,天线相位中心偏差的水平分量也有所不同。因此,在高精度的 GPS 定位测量中,必须分别对不同波段下的天线相位中心进行改正。

参考文献

[1] 张勤,李家权,等. GPS 测量原理及应用. 北京: 科学出版社,2005

[2] 王婷婷,朱瀚,陈义. 利用完全旋转法检测 GPS 接收机天线相位中心三维偏差. 测绘通报,2008,(11):14~17

[3] 周力,张勇虎,郑彬,等. 天线相位中心暗室标定法远场条件研究. 微波学报,2007,(23):45~48

[4] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理. 武汉: 武汉大学出版社,2005

[5] 涂锐,黄观文,邹顺. 天线相位中心偏差变化及改正模型对精密单点定位精度的影响. 大地测量与地球动力学,2010,30(3):113~117

[6] 郭金运,徐泮林,曲国庆. GPS 接收机天线相位中心偏差的三维检定研究. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(4):448~451